

## ***Комунальне господарство міст***

---

УДК 691.32 : 620.193.7

А.А.ПЛУГИН, д-р техн. наук, А.Н.ПЛУГИН, д-р хим. наук,  
Д.А.ПЛУГИН, О.С.БОРЗЯК, Ал.А.ПЛУГИН, кандидаты техн. наук,  
А.А.ДУДИН

*Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г.Харьков*

### **МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ В КОНТАКТНЫХ ПРОВОДАХ**

Рассмотрен механизм электрокоррозии арматуры в железобетонных конструкциях от высоковольтного напряжения в рядом расположенных контактных проводах. Дано количественное описание сил электромиграционного и диффузионного переносов катионов железа при электрокоррозии путем вывода соответствующих физико-химических моделей и уравнений и расчетов по ним.

Розглянуто механізм електрокорозії арматури в залізобетонних конструкціях від високовольтної напруги в розташованих поряд контактних проводах. Дано кількісний опис сил електроміграційного і дифузійного переносів катіонів заліза при електрокорозії шляхом виведення відповідних фізико-хімічних моделей та рівнянь і розрахунків за ними.

The mechanism of reinforcement in concrete electrocorrosion constructions from the high voltage wires adjacent contacts. We give a quantitative description of the forces of electromigration and diffusion transport of iron cations in the electrocorrosion by physicochemical models and equations and calculations on them.

*Ключевые слова:* переменный ток, электрокоррозия, диффузия, электромагнитное поле, двойной электрический слой, электромиграционный перенос.

Представления различных ученых относительно возможности коррозии металлов и арматуры в железобетонных конструкциях от переменного тока являются неоднозначными, а требования нормативных и инструктивных документов разноречивыми.

Анализ литературных данных, эксплуатационные исследования состояния конкретных зданий и сооружений на электрифицированных участках железных дорог, анализ путей попадания на них потенциалов и протекания переменного тока, а также возможных механизмов электрокоррозии от него [1-4] позволяют прийти к заключению, что переменные токи утечки и высоковольтное напряжение являются коррозионно опасными, особенно для обводненных конструкций. Особенно интенсивную электрокоррозию конструкций и арматуры вызывает электрическое поле и токи от высоковольтного напряжения в контактной подвеске, закрепленной на железобетонных сооружениях. Наглядным примером таких разрушений являются фотоснимки на рис.1-4.

Характерными повреждениями железобетонных конструкций от действия высоковольтного напряжения в контактном проводе являются трещины, расходящиеся от арматуры рыжие пятна из продуктов корро-

зии, отслоение защитного слоя и сильная коррозия арматуры в зоне контактных проводов. Характерным является также наведение постоянных электрических потенциалов на различных участках конструкции, хотя напряжение в контактном проводе является переменным.



Рис.1 – Железобетонный путепровод тоннельного типа на 837 км участка Нежин – Киев Юго-Западной железной дороги, электрифицированного переменным током



Рис.2 – Характерные повреждения железобетонных конструкций путепровода тоннельного типа в зоне контактных проводов



Рис.3 – Железобетонный путепровод на 802 км участка Гребенка – Черкассы Южной железной дороги (2004 г.). Под путепроводом проходят электрифицированные переменным током железнодорожные пути



Рис.4 – Разрушенный защитный слой и коррозия арматуры в балке пролетного строения (а) и разрушенная вута и коррозия арматуры в ней (б)

Работы, посвященные исследованию и раскрытию механизма коррозии арматуры в бетоне от действия переменного тока, практически отсутствуют, в отличие от работ по коррозии металлов и арматуры от постоянного тока. Имеющиеся работы носят описательный характер и базируются на применении обычных представлений электрофизики и электротехники с представлением бетона как проводника с активным сопротивлением.

Мнения исследователей об электрокоррозии переменным током разноречивы, а экспериментальные данные неоднозначны, поскольку никто из них не учитывал реальный характер напряжения на рельсах и в контактных проводах и проводимости бетона. Фактически напряжение является не просто переменным, а пульсирующим переменным, а бетон обладает не только активной проводимостью (сопротивлением), а еще и более значимой емкостной проводимостью, обусловленной высокой дисперсностью продуктов гидратации цемента.

С учетом изложенного разработаны новые количественные представления о механизме электрокоррозии арматуры в железобетонных конструкциях под действием высоковольтного напряжения в контактных проводах. Данные представления основаны на фундаментальных положениях коллоидной химии и физико-химической механики об электроповерхностных явлениях в дисперсных системах. Сущность этого механизма заключается в следующем.

Считается, что в конструкциях, расположенных вдоль или под углом к контактному проводу, индуцируется ток такой же частоты, как и в контактном проводе (в данном случае 50 Гц). Соответственно, поперек

арматурного стержня пролётного строения путепровода, расположенного над контактным проводом возникает поляризация со смещением свободных электронов по направлению к контактному проводу, а поверхность арматурного стержня, обращенная к нему, приобретает положительный потенциал и поверхностный заряд. Т.е. поперек стержня в каждый полупериод колебаний напряжения в контактном проводе возникают анодная и катодная зоны и соответствующие им мгновенные электрохимические реакции, в частности с выходом в раствор бетона катионов железа в анодной зоне.

С каждым полупериодом переменного напряжения и выходом из арматуры катионов  $Fe^{2+}$  в ней нарастает избыток электронов и, соответственно, потенциал анода уменьшается до величины, при которой анодная реакция становится минимальной или даже останавливается. Переход катионов  $Fe^{2+}$  будет происходить в слой противоионов (ПРИ)  $Ca^{2+}$  частиц гидросиликатного геля. Этому будет также способствовать поляризация двойного электрического слоя (ДЭС) частицы (под влиянием электрического поля), при которой уменьшается концентрация ПРИ в ДЭС частицы со стороны, обращенной к поверхности арматуры.

При смене полярности напряжения оторвавшиеся от арматуры катионы железа не могут вернуться в арматуру из-за прочной связи со слоем ПОИ  $OH^-$  частицы геля. Таким образом, с каждым периодом напряжения из арматуры будет происходить безвозвратный вынос катионов железа и закрепление их в ДЭС частиц геля.

Однако, такой вынос катионов  $Fe^{2+}$  из арматуры вскоре остановится, если не будет параллельно происходить вынос из арматуры освобождающихся электронов. Это осуществляется при смене полярности переменного электрического поля с наведением на поверхности арматурного стержня отрицательного потенциала и возникновением, соответственно, избытка электронов. В отличие от катионов  $Fe^{2+}$ , электроны не могут непосредственно оторваться от катода, это возможно лишь за счет химической (электрохимической) катодной реакции с переходом электронов на какой-либо атом, обладающий окислительными свойствами.

Обычно в катодных реакциях функцию окислителя выполняют атомы кислорода или протоны  $H^+$ . В первом случае при этом образуются ионы  $O^{2-}$ , которые с молекулой воды превращаются в гидроксильные ионы  $OH^-$ , образующие затем с катионами  $Fe^{2+}$  гидроксид железа  $Fe(OH)_2$ . Однако в жидкой фазе бетона ( $pH \approx 12$ ) концентрация протонов ничтожно мала, а поступление кислорода из воздуха ограничено защитным слоем бетона.

Вместе с тем в щелочных растворах, как известно, содержатся в

равновесном количестве гидроксильные комплексы типа  $OH-H^+-OH^-$ , концентрация которых тем больше, чем выше  $pH$  [5]. Под влиянием положительного потенциала на контактном проводе (положительное поле), существующего в течение короткого полупериода напряжения, а также электрического поля освободившегося электрона протоны  $H^+$  из этих комплексов перемещаются по механизму Гротгуса [6], т.е. эстафетному механизму (почти беспрепятственно) [5, 7], к поверхности арматуры, восстанавливаются, окисляя железо в арматуре, превращаясь в атомарный водород (рис.5, а, б, в). Положительный потенциал в соответствующий полупериод колебания напряжения в контактном проводе инициирует также туннелирование электронов из стали [8].

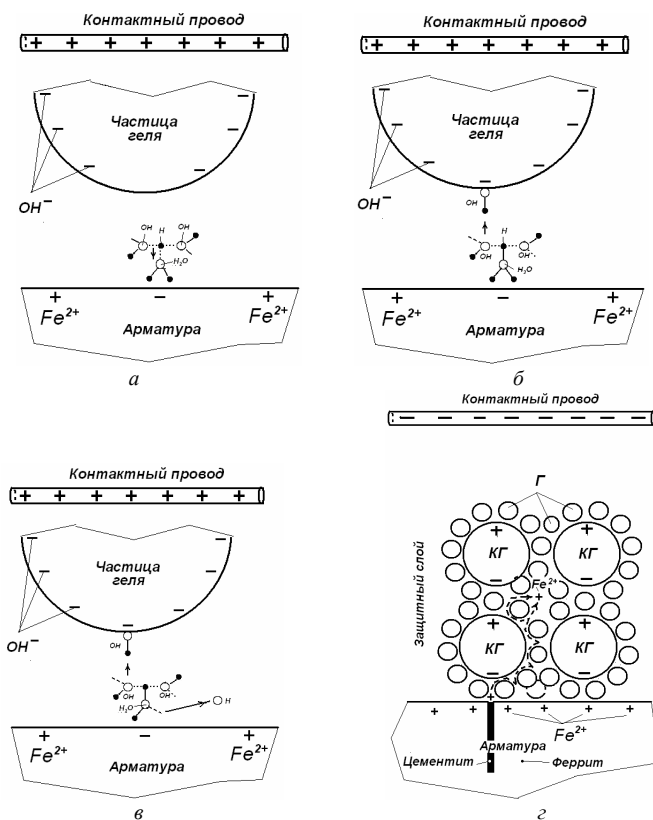


Рис.5 – Схемы электромиграционного переноса отрывающихся от арматуры катионов  $Fe^{2+}$  и образующихся гидроксильных ионов  $OH^-$  под влиянием переменного напряжения в контактном проводе

При нейтрализации освобожденных электронов путем окисления протонами вновь появляется возможность отрыва катионов  $Fe^{2+}$  от арматуры.

При возникновении избыточного положительного заряда в бетоне возникают силы отталкивания между катионами кальция  $Ca^{2+}$ , а также железа  $Fe^{2+}$ , вызывающие растягивающие напряжения в бетоне (точнее его защитном слое). Связывание анионов  $OH^-$  в гидроксид  $Fe(OH)_2$  приводит к уменьшению  $pH$ , растворению и выносу в указанных условиях  $Ca(OH)_2$ , коррозии бетона выщелачиванием.

Количественное описание процессов электрокоррозии арматуры дано путем представления движущих сил переноса – электромиграционного и диффузионного с учетом структуры и поляризации цементного камня в бетоне в виде соответствующих физико-химических моделей и уравнений.

Сила электромиграционного переноса (потока) определяется выражением

$$F_{\text{эм}} = E \cdot Q^{\Gamma} = E \cdot S^{\Gamma} \cdot q^{\Gamma}, \quad (1)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля от напряжения в контактных проводах, В/м;  $Q^{\Gamma}$  – заряд в диффузной части ДЭС частиц гидросиликатного геля, Кл;  $S^{\Gamma}$  – площадь поверхности гидросиликатного геля,  $m^2$ ;  $q^{\Gamma}$  – поверхностная плотность заряда противоионов  $Ca^{2+}$  в диффузной части ДЭС, Кл/ $m^2$ .

Величины  $E$  и  $q^{\Gamma}$  и  $S^{\Gamma}$  могут быть определены по выражениям:

$$E = U / l_{\text{кп}}; \quad (2)$$

$$q = \varepsilon \varepsilon_0 \zeta / d_1; \quad (3)$$

$$S^{\Gamma} = \Pi \alpha \gamma^{\Gamma} s^{\Gamma}, \quad (4)$$

где  $l_{\text{кп}}$  – расстояние контактного провода от конструкции, м;  $\Pi$  – расход цемента в бетоне, г/ $m^3$ ;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость между ПОИ и ПРИ при их непосредственном контакте ( $\varepsilon = 1$ );  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $8,85 \times 10^{-12}$  Ф/м;  $\zeta$  – электрокинетический потенциал гидросиликатного геля, В;  $d_1$  – расстояние между слоями ПОИ и негидратированных ПРИ;  $\alpha$  – степень гидратации цемента;  $\gamma^{\Gamma}$  – доля гидросиликатного геля в продуктах гидратации (около 0,75);  $s^{\Gamma}$  – удельная поверхность гидросиликатного геля (200-700  $m^2/g$ ).

Подставим выражения (2)-(4) в (1):

$$F_{\text{ЭМ}} = \frac{U}{l_{\text{КП}}} \cdot \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{d_1} \cdot \Pi \alpha \gamma^{\Gamma} s^{\Gamma} = \frac{U \varepsilon \varepsilon_0 \zeta \Pi \alpha \gamma^{\Gamma} s^{\Gamma}}{l_{\text{КП}} d_1}. \quad (5)$$

Электромиграционному потоку препятствует его трение о стенки капилляров, которое происходит по линии скольжения воды в ДЭС. Сила этого трения  $F_{\text{ТР}}$  определяется выражением

$$F_{\text{ТР}} = \eta S^{\Gamma} \frac{V}{\delta_{\text{СК}}} = \frac{\eta \Pi s^{\Gamma} V}{\delta_{\text{СК}}}, \quad (6)$$

где  $\eta$  – вязкость воды, Па·с;  $V$  – скорость потока воды, м/с;  $\delta_{\text{СК}}$  – расстояние линии скольжения от стенки капилляров, м.

Можно принять  $\delta_{\text{СК}}$  равным диаметру гидратированного иона в плотной части ДЭС [9, 10]:

$$\delta_{\text{СК}} = 2d_{\text{H}_2\text{O}} + d_{\text{Ca}^{2+}}, \quad (7)$$

где  $d_{\text{H}_2\text{O}}$  – диаметр молекулы воды, м;  $d_{\text{Ca}^{2+}}$  – диаметр катиона  $\text{Ca}^{2+}$ .

При равенстве  $F_{\text{ЭМ}} = F_{\text{ТР}}$  устанавливается стационарный поток, уравнение которого имеет вид:

$$\frac{U \varepsilon \varepsilon_0 \zeta \Pi \alpha \gamma^{\Gamma} s^{\Gamma}}{l_{\text{КП}} d_1} = \frac{\eta \Pi s^{\Gamma} V}{\delta_{\text{СК}}}. \quad (8)$$

Из этого уравнения определится выражение для линейной скорости электромиграционного потока катионов  $\text{Ca}^{2+}$  в бетоне:

$$V = \frac{U \varepsilon \varepsilon_0 \zeta \Pi \alpha \gamma^{\Gamma} s^{\Gamma} \delta_{\text{СК}}}{l_{\text{КП}} d_1 \eta \Pi s^{\Gamma}} = \frac{U \varepsilon \varepsilon_0 \zeta \alpha \gamma^{\Gamma} \delta_{\text{СК}}}{l_{\text{КП}} d_1 \eta}. \quad (9)$$

Проверим правильность уравнения, подставив соответствующие единицы измерения:

$$V = \frac{B \cdot B \cdot m}{m \cdot m \cdot H \cdot c / m^2} = \frac{B \cdot (Kл / м) \cdot м}{H \cdot c} = \frac{Дж}{H \cdot c} = \frac{H \cdot м}{H \cdot c} = \frac{м}{c}. \quad (10)$$

Результат соответствует принятой единице измерения линейной скорости, что свидетельствует о правильности выведенной формулы для скорости электромиграционного потока катионов  $\text{Ca}^{2+}$  сквозь бетон (гидросиликатный гель в нем).

В отличие от свободной воды диэлектрическая проницаемость граничной воды уменьшается от 80 (свободная вода) до высокочастотной диэлектрической проницаемости, близкой к 2.

В связи с равномерным распределением тонких слоев воды эта толщина может быть принята и для кристаллогидратов

$$V = \frac{27000 \cdot 1,885 \cdot 10^{-12} \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,75 \cdot 7,6 \cdot 10^{-10}}{1 \cdot 2,53 \cdot 10^{-10} \cdot 0,001} = \frac{68,04 \cdot 10^{-19}}{2,53 \cdot 10^{-13}} = 27 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

За 1-й полупериод колебаний переменного тока (1/100 с) катионы пройдут путь:

$$l_{\text{ЭМ}} = \frac{V}{f} = \frac{27 \cdot 10^{-6}}{100} \left[ \frac{\text{м/с}}{1/\text{с}} \right] = 27 \cdot 10^{-8} (\text{м}) = 0,27 \text{ мкм} = 2700 \text{ \AA},$$

что намного больше толщины ДЭС на частицах и соответствует размерам пор между глобулами гидросиликатного геля и кристаллогидратами, а, следовательно, диаметрам образуемых ими капилляров.

Перенос противоионов  $\text{Ca}^{2+}$  и катионов  $\text{Fe}^{2+}$  приводит за полупериод колебаний переменного тока к возникновению кратковременного огромного дипольного момента на частицах геля и еще большего на частицах кристаллогидратов в связи с накоплением большого количества зарядов на противоположных сторонах частиц и огромного плеча между ними (рис.5, з), по сравнению с плечом в обычных дипольных моментах молекул полярных веществ, например, молекул воды.

Согласно [11], это явление называется гигантской диэлектрической дисперсией, а дипольный момент, согласно [12] – гигантским дипольным моментом.

Расстояние, на которое успевает за один полупериод колебаний переменного напряжения переместиться фронт диффузионной волны может быть определено из формулы для критической частоты, выведенной в [11, 12]:

$$f = D / (\pi b^2), \quad (11)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии катиона железа  $\text{Fe}^{2+}$  (или аниона  $\text{OH}^-$ ),  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $b$  – длина пути диффузионного перемещения катионов  $\text{Fe}^{2+}$ .

Отсюда выражение для расстояния, на которое перемещаются катионы  $\text{Fe}^{2+}$  за один полупериод колебаний напряжения имеет вид:

$$b = \sqrt{D / (\pi f)}. \quad (12)$$

Коэффициенты диффузии  $D$  ионов электролитов в водных растворах уменьшаются с повышением концентрации раствора, однако, не в очень больших пределах. Так, для  $\text{CaCl}_2$   $D$  изменяется в пределах 1,249–1,121 при увеличении концентрации раствора от 0,001 до 0,05 моль/л (для сравнения, концентрация  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в жидкой фазе бетона равна 0,02 моль/л). Подставляя величину коэффициента диффузии катиона  $\text{Ca}^{2+}$  в ДЭС, как для водного раствора электролитов  $D \approx 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$  и частоту  $f = 50 \text{ 1/с}$ , получим:



$$b = \sqrt{\frac{1,2 \cdot 10^{-9}}{3,14 \cdot 100} \left( \frac{m^2/c}{1/c} = m^2 \right)} = \sqrt{38 \cdot 10^{-12}} = 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 6,2 \text{ мкм}.$$

В отличие от растворов электролитов, коэффициент диффузии ионов в бетоне изменяется в очень широком интервале – от 0,001 до  $\approx 0,00000005 \text{ см}^2/\text{с}$  [13]. Как видим, он может быть как значительно большим (почти в 10 раз), так и намного меньшим (на несколько порядков), чем в растворе.

Подставим в (11)  $D \approx 1 \times 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с} = 1 \times 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$  для бетона с самой высокой проницаемостью:

$$b = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-8}}{3,14 \cdot 100}} = \sqrt{3,18 \cdot 10^{-10}} = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 17,8 \text{ мкм}.$$

Соответственно, для бетона особо низкой проницаемости (W8)  $D \approx 4 \times 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ . Подставляя эту величину, получим:

$$b = \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-10}}{3,14 \cdot 100}} = \sqrt{1,27 \cdot 10^{-12}} = 1,13 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 1,1 \text{ мкм}.$$

Для бетона с наиболее низкой проницаемостью (как в железобетонных шпалах)  $D = 0,000000051 \text{ см}^2/\text{с}$ :

$$b = \sqrt{\frac{5,1 \cdot 10^{-12}}{3,14 \cdot 100}} = \sqrt{1,62 \cdot 10^{-14}} = 1,27 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,027 \text{ мкм} = 27 \text{ нм}.$$

Согласно полученным данным, расстояние, на которое перемещаются диффузионно катионы  $Ca^{2+}$  и, соответственно, катионы  $Fe^{2+}$  в бетоне за один полупериод колебаний переменного напряжения, изменяется в 1500 раз от бетона с высокой проницаемостью до бетона с самой низкой проницаемостью. При этом они перемещаются на большое расстояние, сопоставимое с размером цементных частиц (бетон высокой проницаемости) или маленькое (сопоставимое с размерами глобул геля).

В первом случае они должны накапливаться в цементном камне, а во втором – возвращаться в гидросиликатную массу продуктов гидратации цемента.

Таким же путем при смене полярности поля будут переноситься в поры бетона и на его поверхность анионы  $OH^-$ . По мере выхода в поры бетона и накопления в них с каждым периодом колебаний переменного напряжения анионы  $OH^-$  будут выходить на поверхность бетона и, вместе с катионами железа, образовывать гидроксиды  $Fe(OH)_2$ , а затем  $Fe(OH)_3$ , т.е. будет протекать коррозия арматуры.

Из изложенного следует вывод о зависимости интенсивности про-

цессов электрокоррозии арматуры бетона в переменном электрическом поле от диффузионного переноса в бетоне образующихся ионов железа и гидроксильных ионов, а также ионов жидкой фазы бетона.

Таким образом, механизм электрокоррозии арматуры в железобетонных конструкциях от высоковольтного напряжения в рядом расположенных контактных проводах обусловлен кратковременным увеличением потенциалов анодных и катодных участков в арматуре в такт с переменным напряжением, безвозвратным электромиграционным выносом катионов железа  $Fe^{2+}$  вместе с противоионами  $Ca^{2+}$  в ДЭС частиц гидросиликатного геля и за пределы защитного слоя бетона, который сопровождается выносом из арматуры освобождающихся электронов. При этом они переходят на протоны  $H^+$  в гидроксильных комплексах  $OH-H^+-OH$ , которые подходят к поверхности арматуры по эстафетному механизму.

Значительное влияние на скорость электрокоррозии арматуры оказывает диффузия катионов железа, коэффициент которой зависит от их взаимодействия с потенциалопределяющими ионами  $OH$  частиц геля и диэлектрической проницаемости граничных слоев воды.

Дано количественное описание сил и скорости электромиграционного и диффузионного переносов катионов железа при электрокоррозии путем вывода соответствующих физико-химических моделей и уравнений и расчетов по ним.

1.Плугин А.Н. Исследование влияния токов утечки и блуждающих токов на здания и сооружения, расположенные возле электрифицированных железнодорожных путей / А.Н. Плугин, Ал.А. Плугин, А.А. Дудин, О.С. Борзяк, А.А. Плугин, Д.А. Плугин // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков, 2009. – Вып.40. – С.88-104.

2.Плугин А.Н. Исследование влияния переменного электрического поля в бетоне на его электрокоррозию / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, А.А. Дудин, Ал.А. Плугин, О.С. Борзяк, А.А. Конев // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2010. – Вип.43. – С.517-524.

3.Плугин А.Н. Механизм разрушения кирпичной кладки водопропускной трубы переменным блуждающим током или током утечки / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.С. Герасименко, А.А. Дудин, Ал.А. Плугин // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, 2007. – Вип.42. – С.112-119.

4.Плугин А.А. Теоретические предпосылки защиты бетонных, железобетонных и каменных конструкций от переменных токов утечки / А.А. Плугин, А.А. Дудин, Ал.А. Плугин, А.Н. Плугин // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2008. – Вип.47. – С.179-184.

5.Булычев В.П. Состояние квантово-химической теории водородной связи / В.П. Булычев, Н.Д. Соколов // Водородная связь. – М.: Наука. – С.10.

6.De Grothuss C.J.T. (1806) Sur la décomposition de l'eau et des corps qu'elle tient en dissolution à l'aide de l'électricité galvanique // Ann. Chim. – 58:54. – 73.

7.Привалов П.Л. Вода и ее роль в биологических системах // Биофизика. – Т.1. – Вып.1. – 1968. – С.163-177.

8.Пааш Г. Поверхности твердых тел / Г. Пааш, М. Хитшольд // Достижения электро-

нной теории металлов. – М.: Мир, 1984. – 466 с.

9. Дамаскин Б.Б. Электрохимия / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий. – М: Высш. шк., 1987. – 295 с.

10. Плугин А.Н. Развитие коллоидной химии и физико-химической механики дисперсных систем и материалов для строительных материалов и конструкций / А.Н.Плугин, А.А.Плугин // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків, 2010. – Вип. 125. – С.108-139.

11. Духин С.С. Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах / С.С. Духин, В.Н. Шилов. – К.: Наук. думка, 1972. – 204 с.

12. Плугин А.Н. Электрогетерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих: Дисс... д-ра хим. наук: 02.00.11. – Харьков: ХИИТ, 1989. – 282 с.

13. Пособие по проектированию защиты от коррозии бетонных и железобетонных строительных конструкций (к СНиП 2.03.11-85). – М.: Стройиздат, 1989. – 101 с.

*Получено 13.02.2012*

УДК 624.074 : 624.012.4 : 624.014.2

Л.І.СТОРОЖЕНКО, д-р техн. наук, А.В.ІВАНЮК

*Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка*

### **ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТАВРОВИХ БАЛОК З АРМУВАННЯМ ВЕРТИКАЛЬНИМИ ЛИСТАМИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ**

Розглянуто методику дослідження особливостей напружено-деформованого стану сталезалізобетонних таврових балок з армуванням сталевими листами при використанні чисельних методів розрахунку.

Рассмотрена методика исследования особенностей напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных тавровых балок с армированием стальными листами при использовании численных методов расчета.

The article describes method of research of stress-strain state of composite steel and reinforced concrete T-beams with reinforcing steel sheets using numerical methods of calculation.

*Ключові слова:* метод скінченних елементів, модель, напружено-деформований стан, сталеві листи, сталезалізобетонні конструкції.

В сучасній будівельній індустрії інтенсивними темпами відбувається пошук нових сполучень сталі та бетону для досягнення більш високих техніко-економічних показників будівель і споруд за рахунок використання переваг кожного з компонентів комплексних конструкцій при одночасному усуненні їх недоліків. Внаслідок цього останнім часом в будівництві все частіше розпочали застосовувати сталезалізобетонні конструкції, які являють собою сполучення прокатних сталевих профілів, стрижневої арматури та бетону [5].

Але до цього часу не вирішена проблема проектування таких конструкцій, яка полягає у визначенні кількості арматури, розмірів поперечного перерізу та способів армування. Запропонована нами сталезалізобетонна конструкція є новою, а отже, потребує детального дослідження